

Fuente de Alimentación para los Imanes Superconductores del Acelerador de Partículas Europeo XFEL¹

O. García, A. Francés, J.M. Fernández, P. Varela, G. Catalanotto,
P. Alou, J.A. Oliver, R. Asensi, R. Prieto, J. Uceda, J.A. Cobos

Universidad Politécnica de Madrid
Centro de Electrónica industrial
o.garcia@upm.es

Abstract- En este artículo se presenta la fuente de alimentación que se está diseñando para alimentar los imanes superconductores del acelerador de partículas europeo XFEL que se está construyendo en Hamburgo, cuyas características le hacen el más avanzado del mundo.

Un imán superconductor es una carga muy inductiva que debe ser controlada en corriente y que presenta una caída de tensión muy baja cuando está en modo superconductor. La fuente debe ser capaz de alimentar esta carga con una alta fiabilidad e incorporar varias protecciones que protejan esta carga tan especial.

I. INTRODUCCIÓN

El Acelerador de partículas XFEL es una instalación científica singular que se está construyendo en Hamburgo y tiene 3,4 kms. de longitud. Se trata de un acelerador de electrones que, convenientemente guiados mediante imanes superconductores genera flashes de rayos X. Esta luz, de gran precisión y que se puede concentrar, filtrar y reflejar permitirá a los científicos ahondar en la estructura de la materia, reacciones químicas, explorar el nano-mundo,.. Para saber más se puede consultar [1].

Para guiar el haz de electrones se utiliza el campo magnético creado por unos imanes superconductores. La principal característica eléctrica de estos elementos es que cuando la temperatura baja suficientemente (entre 2K y 4K) su resistencia es casi nula permitiendo el paso de una gran corriente sin presentar apenas pérdidas [2].

Para esta aplicación, es fundamental que el imán genere un campo magnético muy preciso y para eso es necesario controlar su corriente. La fuente de alimentación necesaria para este tipo de circuitos es bastante peculiar ya que se debe controlar con la corriente de salida y su tensión debe cambiar desde los instantes iniciales cuando se magnetiza el imán a casi cero cuando esta en modo de superconducción [3].

En este artículo se muestra el diseño de la etapa de potencia para los imanes del XFEL, las protecciones que exige una aplicación de este tipo y los resultados obtenidos con los prototipos. Asimismo se incluye una discusión sobre el sistema de control y redundancia.

Cuando los prototipos estén validados completamente se pasará a la fase de producción donde se fabricarán 250 unidades de la misma.

II. ESQUEMA GENERAL DE LA FUENTE

La fuente de alimentación está contenida dentro de una caja estándar tipo rack de 2U de altura (ver figura 1). La mitad de esta caja está ocupada por la circuitería de control, supervisión y comunicaciones de la fuente. Hay que tener en cuenta que se debe poder controlar y conocer en todo momento el estado de la fuente desde el puesto central a través de una conexión Ethernet. La otra mitad contiene la etapa de potencia.

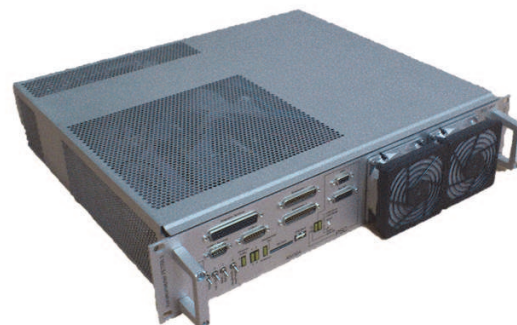


Figura 1.- Aspecto de la fuente de alimentación en desarrollo

La etapa de potencia está diseñada de forma que pueda entregar 50 A y 10 V (500 W) y está redundada para aumentar la fiabilidad de la misma (ver figura 2). La tensión de salida baja a unas pocas décimas de voltio cuando el imán está superconduciendo. La energía se toma de la red eléctrica europea (230V, 50Hz).

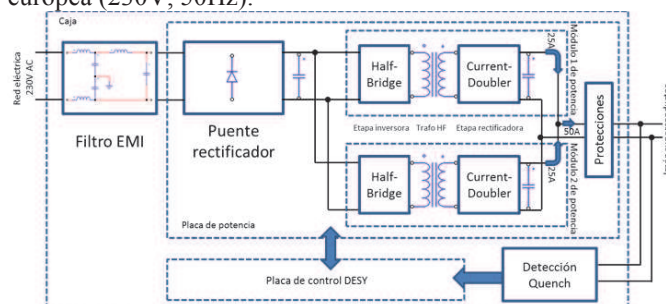


Figura 2.- Diagrama de bloques de la etapa de potencia de la fuente de alimentación

¹ Este trabajo ha sido subvencionado por el MINECO a través del proyecto AIC10-A-000516

Como se ha comentado anteriormente, el control de la corriente por el imán es crítico y por eso se ha incluido un transductor DCCT que proporciona una medida muy precisa y es muy estable con la temperatura (su deriva térmica es menor a 0,1ppm/°C), siendo éste el elemento más caro del sistema.

III. TOPOLOGÍA Y DISEÑO

Etapas de potencia

Al comienzo del proyecto se hizo un estudio de la topología de potencia más adecuada. El convertidor en medio puente presenta un muy buen compromiso respecto a esfuerzos de tensión y corriente en los dispositivos semiconductores para la potencia del circuito, manteniendo la simplicidad circuital. Se optó por un rectificador doblador de corriente, menos habitual que el de doble onda con toma media [4]. La principal ventaja que permite es disminuir el número de vueltas del secundario del transformador y así aumentar la sección del conductor y conectarlo directamente con las dos bobinas que presenta el circuito, sin elementos intermedios, disminuyendo las resistencias parásitas y de los contactos (fig.3).

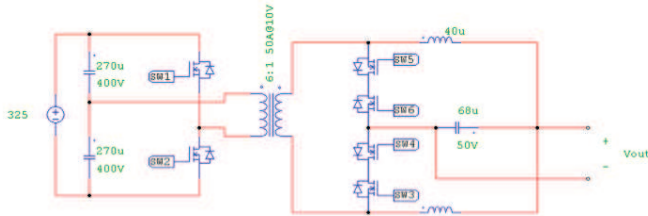


Figura 3.- Convertidor en medio puente con rectificador doblador de corriente y rectificación síncrona

Debido a la baja tensión en secundario se ha incluido rectificación síncrona. Asimismo, esta fuente debe ser capaz de proporcionar tensión y corriente de salida negativas (para cambiar el sentido del campo magnético) y por ello se aprecia en secundario dos rectificadores síncronos adicionales en configuración anti-serie.

Transformador plano

El elemento clave de la etapa de potencia es el transformador. No sólo es necesario tener bajas pérdidas de potencia y buen acoplamiento sino que además hay que pensar en la fabricación posterior de las fuentes. Por estos motivos y sobre todo por el último el transformador plano es ideal. La repetitividad es clave para asegurar el buen funcionamiento de la serie a fabricar.

El transformador fabricado se muestra en la figura 4. La inclusión de las distancias necesarias para el aislamiento entre pistas y vías de primario y secundario penaliza el diseño pero aún así el rendimiento del circuito aumenta con este transformador (2% a plena carga).

El transformador es un 12:2; la figura 5 muestra la estructura de capas de este transformador: 8 para primario con 3 vueltas (2 paralelos) y 8 para el secundario con una única vuelta (4 paralelos). No se ha realizado un entrelazado de capas muy optimizado ya que aunque disminuía la inductancia de

dispersión aumentaba la capacidad, lo cual se ha mitigado en parte aumentando el grosor del aislante (fig.5). Estas capas se unen primero en serie, formando unos mini-transformadores y luego todos ellos en paralelo.

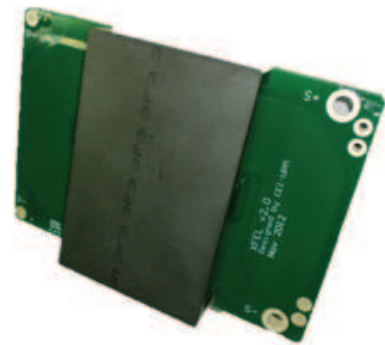


Figura 4.- Fotografía del transformador plano desarrollado para la fuente de alimentación

Un factor importante es la asociación serie-paralelo de las capas para mejorar la distribución de corrientes entre los devanados [5].

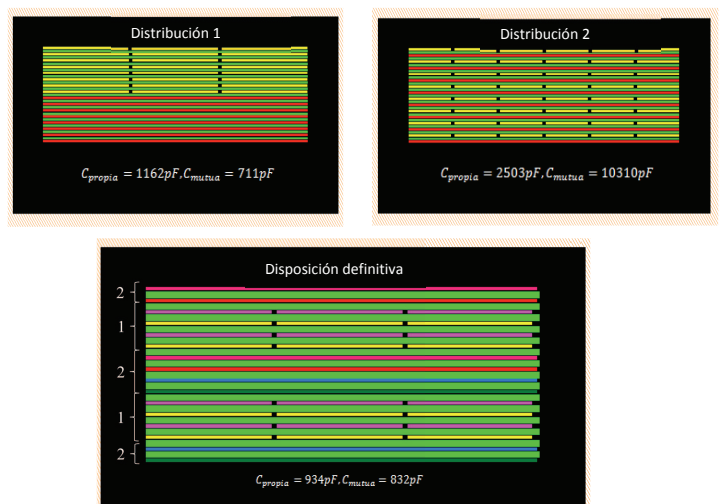


Figura 5.- Estructura de capas del transformador plano desarrollado para la fuente de alimentación

IV. PROTECCIONES

La aplicación de este circuito exige que esté altamente protegido ante fallos internos y que no se propaguen hacia otros elementos. Cada etapa incluye fusibles y relés para conectar y desconectar. Entre las protecciones electrónicas se encuentran:

- Detector de pulsos en el secundario del transformador.
- Detector de fugas de corriente por tierra.
- Detectores de temperatura en diversos puntos.
- Detector de la tensión de entrada.
- Detector de 'quench'.

Esta última es fundamental ya que el imán puede dejar de estar en modo superconducción y aumentar su tensión

bruscamente. En estas circunstancias, hay que desconectar la fuente del imán para evitar un sobrecalentamiento que lo pueda destruir. Es por tanto necesario detectar esta situación de aumento de tensión (quench) como se muestra en la figura 6 e incluir en el circuito una protección que se dispare y permita disipar toda la energía en una resistencia de potencia.

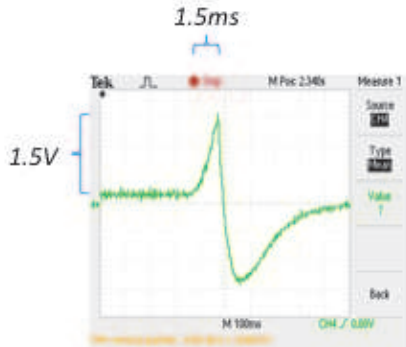


Figura 6.- Transitorio que se produce cuando se produce un 'quench' en el imán superconductor

Aparte de las protecciones que lleva cada etapa, hay un nivel de protección adicional que proporciona la redundancia de las etapas de potencia dentro de la misma fuente de alimentación (fig. 2). En condiciones normales, las 2 etapas proporcionan la mitad de la corriente del imán pero, en caso de que una de ellas falle, ésta se desconecta y toda la corriente es suministrada por la otra.



Figura 7a.- Diagrama de bloques de la caja de redundancia

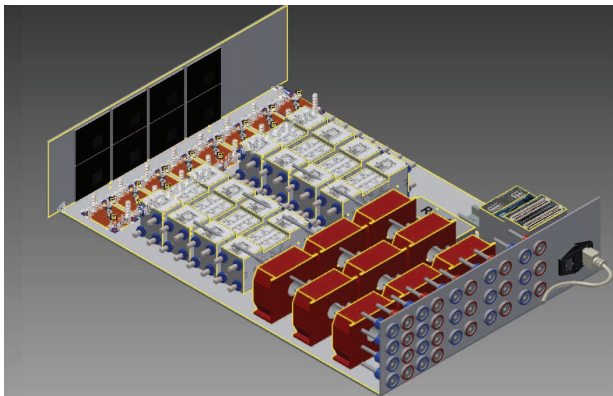


Figura 7b.- Diseño preliminar de la caja de redundancia

El último nivel de protección lo proporciona la denominada caja de redundancia. Se trata de un sistema que conecta 8 imanes y 9 fuentes de alimentación (fig.7a). Cuando falla una fuente completa (es decir sus 2 etapas de potencia o su circuito de control), ésta se desconecta y entra la novena fuente que estaba en estado de *stand-by*. Con este sistema, se minimizan los tiempos en el que túnel está parado ya que el control y

monitorización de todo se hace a distancia y de forma casi automática.

La figura 7b muestra un diseño preliminar de la caja de redundancia donde destacan los sensores de corriente y los elementos de conmutación fuente-imán, así como el módulo de comunicaciones.

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como es de suponer, se han realizado varias versiones de la etapa de potencia según se han ido detectando errores o mejorando su funcionamiento y añadiendo funcionalidad debido a algunos requisitos que cambiaron desde el comienzo del proyecto. En este momento del proyecto, las pruebas se han realizado con cargas dinámicas y no con los imanes reales; esto se realizará en las instalaciones de Hamburgo más adelante. La figura 8 muestra una fotografía del banco de pruebas.

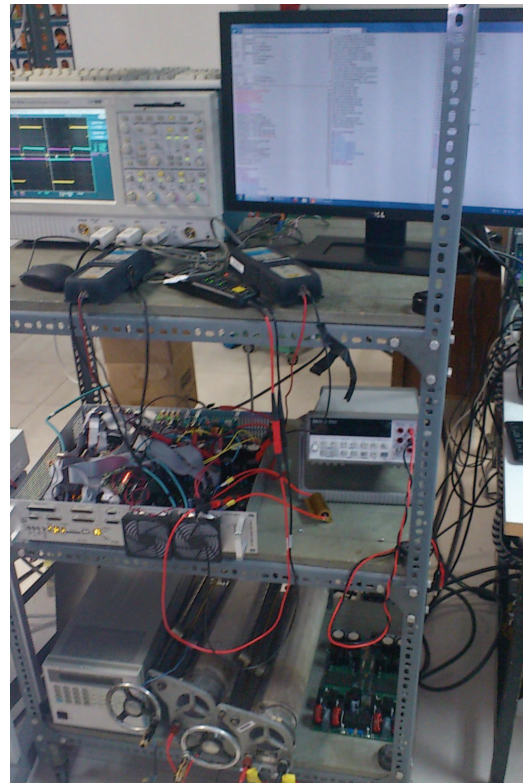


Figura 8.- Banco de pruebas

La tensión en el primario del transformador del medio puente a plena carga se muestra en la figura 9 y puede apreciarse que las oscilaciones debidas a inductancias parásitas no son muy grandes gracias en gran parte al transformador plano empleado.

El rendimiento del convertidor se muestra en la figura 10. Debido al alto consumo del circuito de control y comunicación, el rendimiento en función de la carga se incluye con y sin esta parte. Como puede apreciarse el rendimiento del circuito de potencia a plena carga es bastante alto (91%) aunque queda muy penalizado por el gran consumo del sistema de control y comunicación, que consume entre 30

y 40 W según las condiciones. Aún así, el rendimiento completo a plena carga supera el especificado.

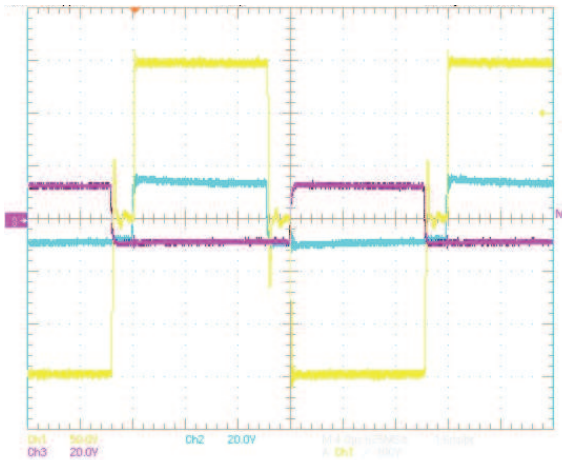


Figura 9.- Tensión en el primario del transformador (50V/div) y señales de disparo (20V/div) a plena carga

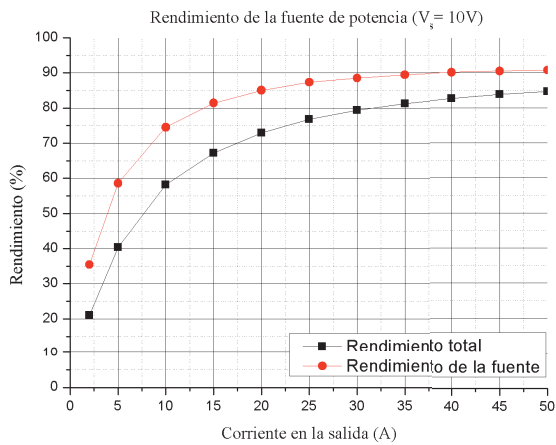


Figura 10.- Rendimiento del convertidor en función de la corriente del imán para tensión de salida igual a 10 V.

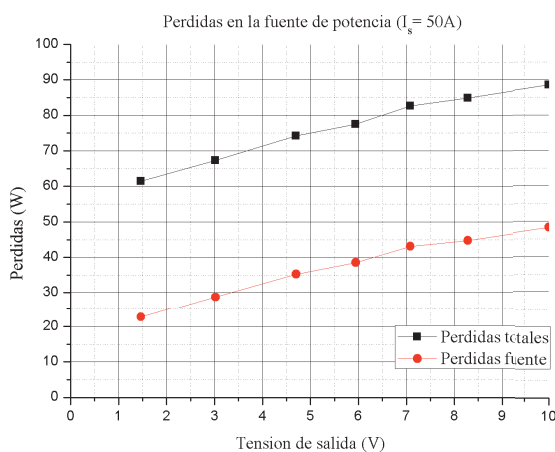


Figura 11.- Pérdidas en la fuente de alimentación para 50 A de salida variando la tensión de salida

En este caso, el rendimiento a plena carga no es un dato excesivamente importante ya que el convertidor sólo estará

unos segundos en esa situación; es quizás más interesante saber el consumo a tensiones de salida bajas (fig.11). De nuevo se muestra este consumo desglosado entre potencia y control.

Conviene aclarar que esta fuente presenta un sistema de control mixto frecuencia-ciclo de trabajo de forma que para bajar la tensión de salida se baja el ciclo de trabajo pero a partir de un determinado t_{on} mínimo, se disminuye la frecuencia de conmutación.

La figura 12 muestra dos fotografías de algunos de los prototipos construidos.

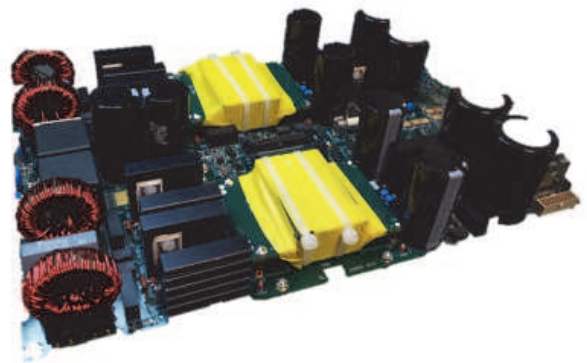


Figura 12.- Dos de los prototipos fabricados

VI. CONCLUSIONES

En este artículo se ofrece una visión sobre la fuente de alimentación que alimenta los imanes superconductores del acelerador de partículas XFEL. La topología medio puente con doblador de corriente se muestra muy adecuada en esta aplicación donde hay que entregar una corriente relativamente alta (50 A) con una tensión muy pequeña (décimas de voltio). Para alcanzar el margen de tensión de salida requerido se ha optado por un control mixto ciclo de trabajo-frecuencia de conmutación.

También se han descrito los principales requisitos que debe presentar la fuente en cuanto a protecciones y redundancia tanto a nivel de convertidor como de sistema. Los resultados experimentales muestran que el prototipo realizado está cumpliendo las especificaciones en cuanto a tamaño, rendimiento y fiabilidad. También han sido satisfactorias las pruebas de EMI/EMC y aislamiento. En cuanto acaben las pruebas de la miniserie enviada a Hamburgo, podrá ser enviado para a su fabricación en serie.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el gobierno español a través del proyecto del Ministerio de Economía y Competitividad con referencia AIC10-A-000516.

Los autores quieren agradecer a Noemí Nogar su colaboración e implicación en el desarrollo de los prototipos.

REFERENCIAS

- [1] Página web del acelerador de partículas XFEL: <http://www.xfel.eu/>
- [2] F. Toral, P. Abramian, R. Bandelmann, H. Brueck, J. Calero, D. Carrillo, L. Garcia-Tabares, J.L. Gutierrez, E. Rodriguez, I. Rodriguez, S. Sanz, M. Stolper, "Magnetization Effects on the Superconducting Combined Magnet Prototype for XFEL", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 3, Parte 2, pp. 1136 – 1140, 2009
- [3] N. Heidbrook, "Correction magnets power supply", Proceedings of EPAC 2002, pp. 2475-2477.
- [4] P. Alou, J.A. Oliver, O. García, R. Prieto, J.A. Cobos, "Comparison of current doubler rectifier and center tapped rectifier for low voltage applications", IEEE Applied Power Electronics Conference APEC, 2006. pp. 744-750.
- [5] R. Asensi, R. Prieto, J.A. Cobos, "Automatized connection of the layers of planar transformers with parallel windings to improve the component behavior", IEEE Applied Electronics Conference (APEC) 2012, pp. 1778-1782